

变截面筒桩承载力特性数值模拟研究与设计

王凯, 郑昂, 张钰赫, 姚占勇, 姚凯
(山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002)

摘要: 本文基于相关理论分析、数值模拟、工程现场试验等研究方法, 根据黄泛区地层特点, 结合传统搅拌桩技术对桩体结构设计进行分析和优化, 重点开展变截面筒桩数值模拟等研究工作, 提出变截面筒桩的设计方法和工程方案, 并开展工程试验评价变截面复合浆喷桩成桩质量和地基加固效果, 分析变截面筒桩承载特性, 明确变截面筒桩受力性状, 为工程应用提供可靠的理论指导。同时针对变截面筒桩的不同设计方案进行优化, 分析不同方案下筒桩各部位的性能表现, 明确桩体受力性状, 为工程实际桩基布置提供参考。基于结构分析和工程试验, 优化变截面水泥土浆喷复合桩结构一体化设计方案, 将有效改善黄泛区高速公路地基加固工程质量、降低地基加固成本, 具有显著的经济效益和社会效益。

关键词: 搅拌桩; 变截面; 数值模拟; 筒桩; 单桩承载力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0031-08

Structural design and numerical study on bearing capacity of variable cross-section tubular pile

WANG Kai, ZHENG Ang, ZHANG Yu-he, YAO Zhan-yong, YAO Kai
(School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: Based on relevant theoretical analysis, numerical simulation, engineering field test and other research methods, this paper analyzes and optimizes the design of pile structure based on traditional mixing pile technology according to the stratigraphic characteristics of the yellow floodplain area. It focuses on numerical simulation of variable cross-section tubular piles, puts forward the design method of variable cross-section tubular piles and engineering scheme, and carries out engineering test to evaluate the pile quality and foundation reinforcement effects. The study analyzes the load-bearing characteristics of these piles, clarifying their stress conditions to provide reliable theoretical guidance for engineering applications. Additionally, different design schemes for variable cross-section tubular piles are analyzed and optimized to assess the performance of various sections and understand the stress conditions of the piles, providing practical guidance for pile foundation layout in engineering projects. Through structural analysis and engineering tests, an integrated design scheme for variable cross-section cement-soil slurry spraying composite piles is optimized. The implementation of this technology is expected to significantly improve the quality of highway foundation reinforcement in the yellow floodplain area and reduce reinforcement costs, yielding notable social and economic benefits.

Key words: mixing pile; variable cross-section; numerical simulation; tubular pile; bearing capacity of single pile

0 引言

近些年来, 我国道路交通基础设施迅速发展, 截至 2022 年底, 我国高速公路里程已达 17.7 万公里, 位居世界第一。控制路基工后沉降一直是工程设计施工的关键因素。高速公路的新建及改扩建带

来了大量的地基处理工程。黄泛区是我国特有的因黄河泛滥而成的平原区域, 广泛分布在山东、河北、河南、江苏等地。这些地区地基软弱, 路基工后沉降问题突出, 因此, 地基加固成为平原区高速公路建设的主要工程内容之一。

水泥土搅拌桩是最常用的地基处理方法之一,

能够有效减少软土地基沉降,在工程建设领域得到了广泛应用^[1-2]。传统的水泥搅拌桩施工工艺是通过桩机钻进、喷射浆液、搅拌形成圆柱形水泥土搅拌桩。然而在山东部分高速公路地基处理工程施工时,存在水泥浆液与土体混合搅拌不均匀现象,常出现成桩形状不规则、承载力严重不足等质量缺陷,存在严重的工程隐患,可能引发一系列工程质量和交通安全问题,也造成了工程材料的浪费。针对地基处理工程中出现的一系列问题,本文根据水泥土搅拌桩设计要求进行承载力特性研究分析并验证新型搅拌桩技术的可靠性,新型搅拌桩技术亟需改进。

随着土木工程领域的发展和技术的进步,工程师们开始研究和探索更加高效、稳定的基础形式。在这个背景下,新型桩设计及应用验证开始发展,在这个过程中变截面筒桩技术的设计理论和施工技术逐渐完善,并在工程实践中得到广泛应用。特别是在高层建筑、桥梁、码头和海洋工程等领域,变截面筒桩展现出了其独特的优势和应用价值。至今,变截面筒桩已经成为地基基础工程领域中不可或缺的重要组成部分,为各类工程提供了可靠的基础支撑^[3]。本文针对水泥土搅拌桩变截面技术和筒桩技术相结合的形式进行探究^[4-6],通过数值模拟和现场试验,分析桩身应力和承载特性,探究变截面筒桩不同设计及施工参数下的各项性能表现,研发出一种变截面筒桩地基加固处理技术^[7],实现在提高地基承载力的前提下达到减少桩体变形、降低施工成本、减少软土地基沉降的目的,可在工程建设领域中广泛应用^[8]。

1 有限元模型的建立及验证

1.1 数值模拟介绍

作为国际上功能强大的大型通用有限元软件之一,ABAQUS 所具有的本构模型能够真实反映土体性能,并且可以进行有效孔隙压力和有效应力的计算,ABAQUS 具有较为强大的接触面处理功能,可以模拟结构与土之间的滑移、脱开等现象,还可以准确、灵活地建立初始应力状态和处理挖土、填土等岩土工程中特定的问题,对于岩土工程有较强的适用性。

一般来说,土体的材料强度比桩体要小很多。在竖向荷载的作用下,桩因为自身强度高几乎不会发生塑性破坏,所以桩可以采用线弹性模型^[9-10],其本构方程式如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{cases} = \begin{pmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{pmatrix} \begin{cases} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{cases} \quad (1)$$

长期以来,国内外研究人员针对土体本构模型进行了大量的研究分析,总结出数百种土体本构模型,目前应用比较广泛的有 M-C 模型(摩尔-库伦模型)、MC-C 模型(修正剑桥模型)、D-P 模型(弹塑性模型)等。本文建立及使用的模型为岩土工程中广泛使用的 M-C 模型。M-C 模型是一种理想的弹塑性模型,它综合了虎克定律和库伦破坏准则,被广泛用于模拟大部分岩土材料。该模型主要控制参数有 5 个,包括弹性模量和泊松比控制弹性行为,黏聚力、内摩擦角以及剪胀角控制塑性行为。此外,还可以输入残余摩擦角以及残余黏聚力,使得数值模拟结果更加准确可靠。因此,本文采用 M-C 模型模拟桩周土体^[11-12],有限元计算软件 ABAQUS 运行步骤如图 1 所示。

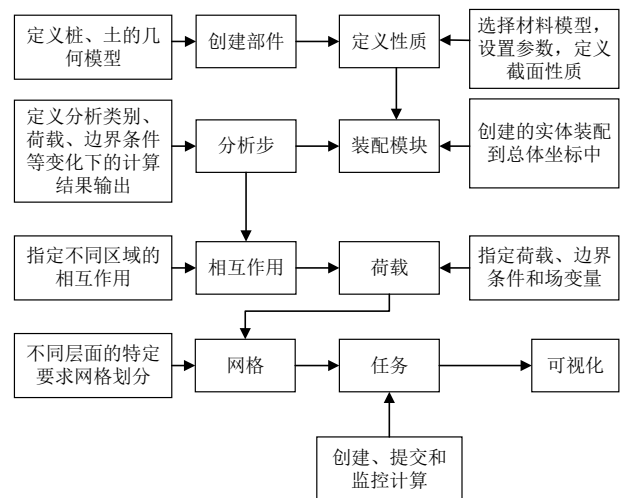


图 1 有限元计算软件 ABAQUS 运行步骤

Fig. 1 Running steps of finite element calculation software ABAQUS

1.2 模型可靠性验证

进行参数分析前,本文首先对所采用的数值模拟方法的可靠性进行验证^[13],同时针对变截面搅拌桩进行现场试验^[14],试验参数选取来自山东省济宁市某高速公路。

土体按照地勘资料进行建模,土层物理力学参数和桩-土力学建模参数^[15]见表 1~2。桩体量量根据现场取样进行室内无侧限抗压强度试验和《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[16]中针对

无限侧抗压强度要求取值为 600 MPa。图 2 为工程现场桩体开挖形貌。

表 1 土层物理力学参数

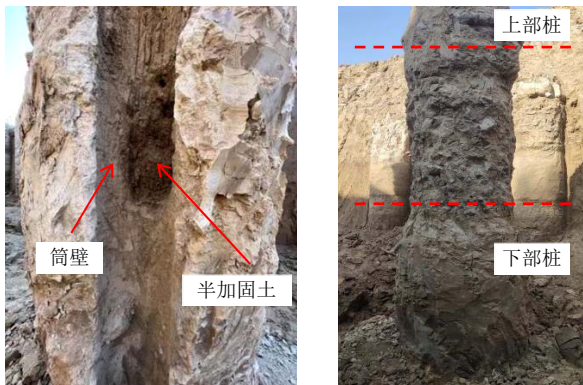
Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil layer

土类	深度/ m	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
粉质黏土	0.0~5.5	18.9	22.8	14.6	6.66
淤泥质黏土	5.5~8.0	18.6	32.9	8.9	4.44
粉质黏土	8.0~10.0	19.1	26.2	14.3	5.18
粉质黏土	10.0~20.0	19.2	23.5	15.5	7.00

表 2 桩-土力学建模参数^[15]

Table 2 Pile-soil mechanical modeling parameters^[15]

部件名称	模量/ MPa	密度/ (g/cm ³)	泊松比	内摩擦角/(°)	膨胀角/(°)	屈服应力/kPa	桩土摩擦系数
封顶	600	2.1	0.35	—	—	—	0.6
封底	600	2.1	0.35	—	—	—	0.6
筒壁	600	2.1	0.35	—	—	—	0.6
底部桩	400	2.1	0.35	—	—	—	0.6
半加固土	50	2.0	0.35	—	—	—	0.6
土体	7	1.9	0.30	15.0	0.1	22.8	0.6



(a) 变截面筒桩上部桩开挖示意图 (b) 筒桩头部桩构造

图 2 工程现场桩体开挖形貌

Fig. 2 Appearance of pile at project site

对于变截面筒桩来说, 桩体上部采用钻搅喷一体工艺施工, 使得上部桩为钻搅喷一体筒桩 (大直径), 而下部为高压劈裂圆柱形桩 (小直径), 并在交界处封底封顶 (总称封壳), 即通过在其头部桩的上部、下部布置圆柱形实体桩对其顶部、底部

进行封顶封底, 同时将被筒壁掺入水泥包裹的土体 (后续称为半加固土) 强度值定为未加固土强度值和加固土强度值之间。根据现有施工机理以及研究, 模拟桩体总长为 10 m, 变截面筒桩外径为 0.8 m, 内径为 0.5 m, 即厚度为 0.3 m 的筒壁桩体, 底部圆柱形桩体直径为 0.5 m, 变截面筒桩设计整体示意图见图 3。由于封顶封底和筒壁部分采用钻搅喷一体施工的模量较大^[17], 模型中土体参数的选择依据山东省黄泛区土质实验获取的参数。

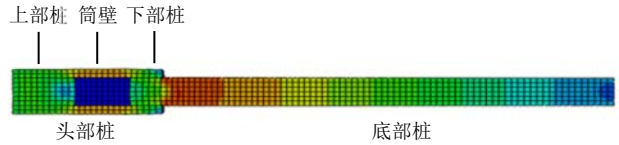


图 3 变截面筒桩设计整体示意图

Fig. 3 Overall design of variable cross-section tubular pile

为简化分析, 忽略桩体的塑性, 桩体采用线弹性模型。在桩顶分级施加荷载, 与现场所做静载试验相同, 每级荷载为 100 kN。

网格划分对有限元计算精度影响较大, 需要反复调试, 改变单元格尺寸, 防止因变形过大而产生不收敛现象。根据从属关系, 设置桩体侧表面为主表面, 桩侧面与土体接触的表面为从表面。另外, 切向接触中摩擦计算公式采用罚函数, 进而可以更改摩擦系数模拟不同程度的桩土作用, 法向为硬接触。

下面针对变截面筒桩的不同参数进行 3 组模型的模拟, 3 组不同高度筒桩模型见表 3, 主要针对桩总长度保持 10 m 不变的前提下, 筒壁长度变化导致的承载力变化情况, 并将模型运算结果和现场试验的实际数据进行分析比较, 以此验证模型的可靠性。

表 3 3 组不同高度筒桩模型

Table 3 Three sets of tubular pile models with different heights

模型号	上部桩 长/m	筒壁 长/m	下部桩 长/m	底部桩 长/m	拟合度 R ²
1	1	1	0.5	7.5	0.85
2	1	3	0.5	5.5	0.99
3	1	5	0.5	3.5	0.95

图 4 为数值模拟和现场试验数据 p-s 对比图, 由图 4 可知, 在达到沉降突变点之前, 数值模拟与现场试验的曲线基本吻合, 随着荷载的增大, 沉降骤增点之后差异较大, 分析原因是因为数值模拟采用的本构模型处于理想条件, 符合误差标准。

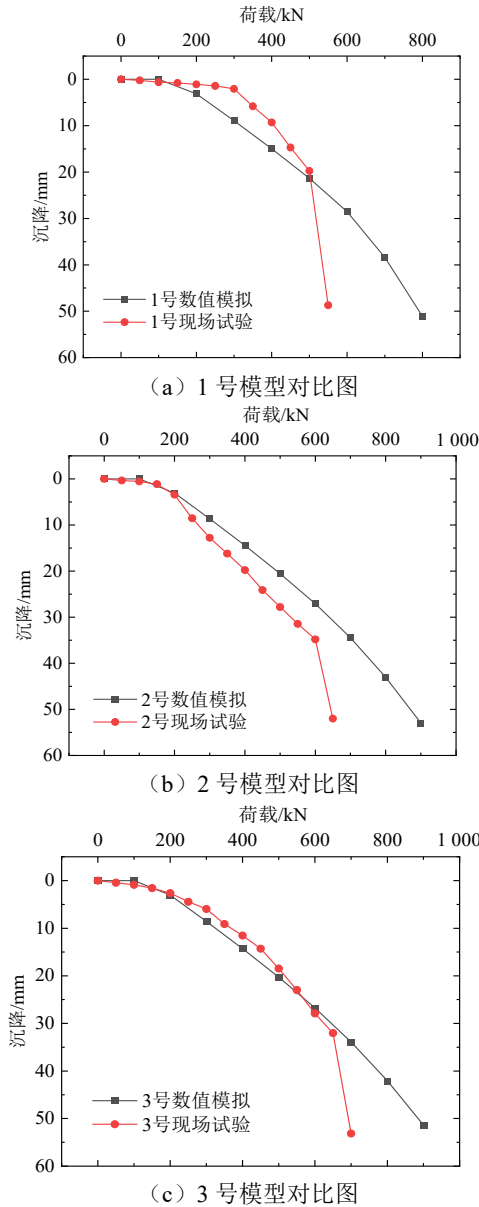


图4 数值模拟和现场试验数据 $p-s$ 对比图
Fig. 4 Load-displacement curves between numerical simulation and field test

综上所述，单桩数值模型与现场试验数据相吻合，模型具有可靠性，根据上述模型对变截面筒桩承载特性作进一步分析，并对几何参数进行优化调整。

2 变截面筒桩承载特性分析

2.1 建模参数

本文共模拟9种不同几何参数的工况，其中1~4号设置为上、下部桩长（即封顶、封底）1 m，筒壁长度由1 m变化至4 m；5~9号为上、下部桩长0.5 m，筒壁长度由1 m变化至5 m。模型只对桩体的结构参数进行研究，土层简化为均质分布，土质参数取粉质黏土典型值，通过这9种工况研究变截

面筒桩的承载特性^[18-19]，并对其几何参数进行优化，变截面筒桩几何参数见表4。

表4 变截面筒桩几何参数
Table 4 Geometric parameters of variable cross-section tubular pile

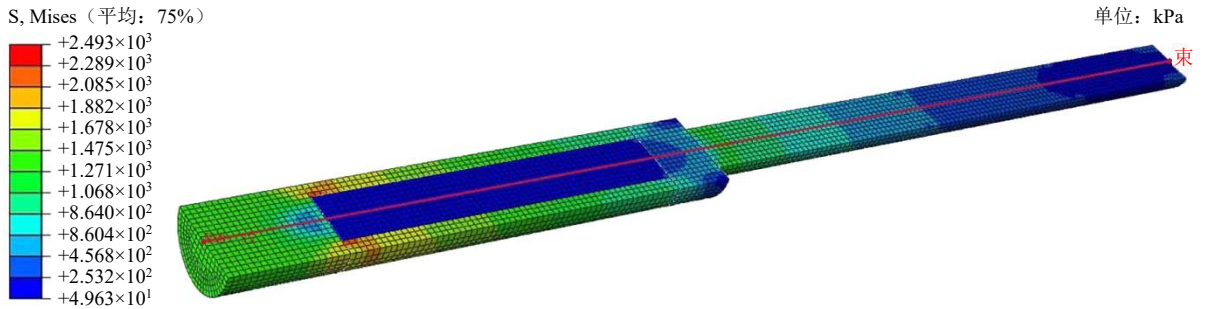
编号	筒壁长	底部桩长	上、下部桩（封壳）长	筒桩总长	筒桩直径	筒桩内径	底部桩直径
1	1	7					
2	2	6					
3	3	5	1.0				
4	4	4					
5	1	8		10	0.8	0.5	0.5
6	2	7					
7	3	6	0.5				
8	4	5					
9	5	4					

2.2 变截面筒桩承载特性

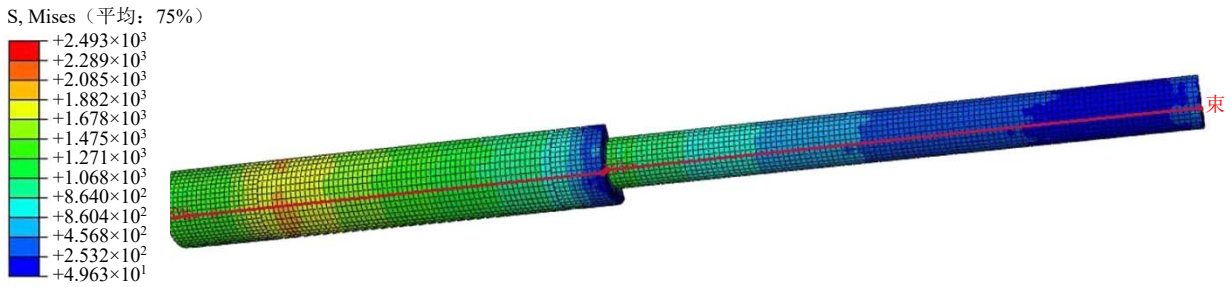
数值模拟结束后，针对数据进行分析，提取变截面筒桩桩体内部中线（路径经过变截面筒桩上部桩、筒壁、下部桩、底部桩）竖向应力、外部中线竖向应力，具体提取路径示意图见图5。选择表4中1~9号试验桩，提取其桩体内外部中线轴向正应力，得到9种不同工况下埋深（深度）和 S_{33} （竖向应力）之间的关系，并进行处理分析得到图6~7。本文以竖直向下为正向，由于竖向应力方向向上，故为负数。

由图6可知：桩体应力在上部桩封和筒壁半加固土的交界处大幅降低，又在筒壁半加固土与下部桩的交界处大幅提高，导致半加固土处应力处于低谷，这是由于半加固土采用了较低的模量。随着筒壁变长，下部桩桩体应力峰值逐渐降低，经分析有两个原因：（1）筒壁内部的半加固土吸收了小部分应力；（2）筒壁外侧摩阻吸收了大部分应力。此外可观察到筒壁长度相同时，封壳越厚，其应力峰值越小。桩内部的应力峰值出现在下部桩和底部桩的交界处（头部桩与底部桩的交界处）。同时由于筒内部半加固土的强度低，绝大部分荷载均由上部桩、下部桩及筒壁共同承担，推测在封壳和筒壁的交界处发生部分应力集中。

由图6~7对比分析可知，对于变截面筒桩，筒内部和筒外部桩体应力变化完全相反，分析原因认为是由于内侧筒包裹住的半加固土强度低导致筒壁的相对强度较高。



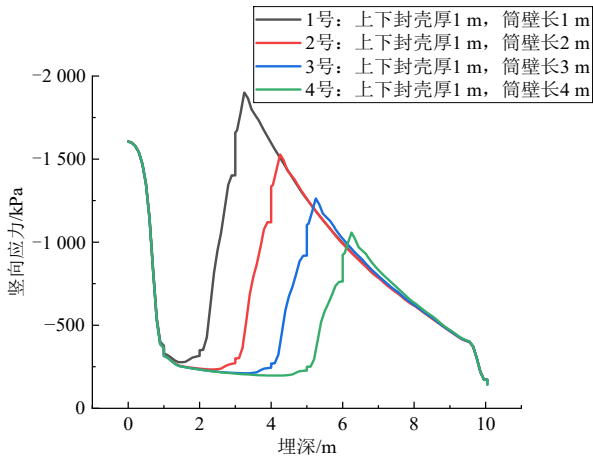
(a) 内部中线应力提取路径



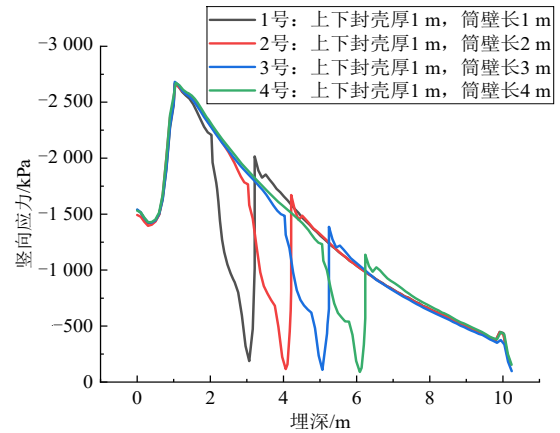
(b) 外部中线应力提取路径

图 5 内部、外部中线应力提取路径示意图

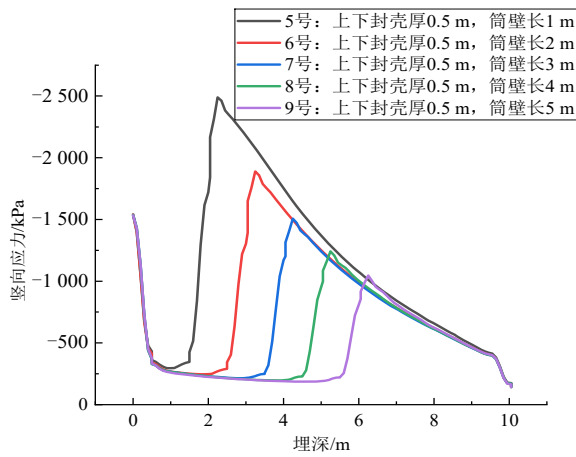
Fig. 5 Schematic diagrams of internal and external centerline stress extraction paths



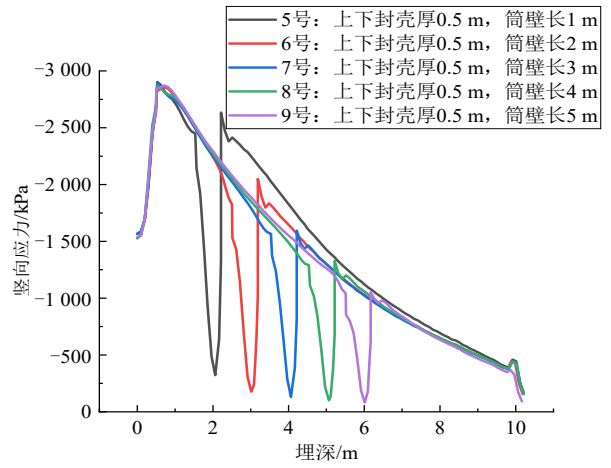
(a) 1~4 号试验桩



(a) 1~4 号试验桩



(b) 5~9 号试验桩



(b) 5~9 号试验桩

图 6 9 种不同工况下变截面筒桩内部埋深-竖向应力曲线图
Fig. 6 Internal depth-vertical stress curves of variable cross-section tubular piles under 9 different working conditions

图 7 9 种不同工况下变截面筒桩外部埋深-竖向应力曲线图
Fig. 7 External depth-vertical stress curves of variable cross-section tubular piles under 9 different working conditions

1号试验桩桩体内、外部埋深-竖向应力曲线如图8所示,应力较大处出现在上部桩与筒壁交界处以及筒壁与下部桩体的交界处,应加大水泥掺量。最大应力出现在上部桩与筒壁的交界处,所以当工程中运用变截面筒桩时需加厚上部封壳。同时对该结果进行进一步优化,提取筒壁应力云图,1号试验桩桩体筒壁侧面和横截面应力云图如图9所示。筒壁应力最大值出现在筒壁上方与上部桩的交界处,应适当增大封顶厚度,以减小此处的应力集中现象,并增大上部桩与筒壁交界处和下部桩与底部桩交界处的水泥剂量,以承担更大的荷载。

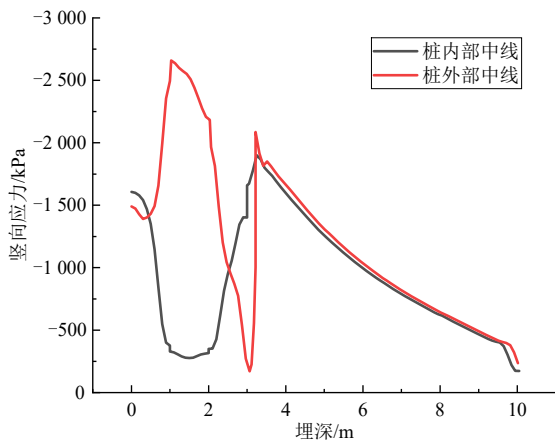


图8 1号试验桩桩体内、外部埋深-竖向应力曲线图

Fig. 8 Internal and external depth-vertical stress curves of test pile No.1

2.3 桩体参数优化

基于上述模型以及得到的结果对变截面筒桩进行参数优化,设计6组模型,主要针对不同上、下部桩(封壳)长、筒壁长、及相同头部桩长下不同筒壁长的尺寸优化,具体参数见表5,不同封壳厚度桩体内部埋深-竖向应力曲线见图10。

根据图10可知,应力峰值出现位置均为头部桩和底部桩的交界处。当桩头总长度不变时,桩头应力随封壳长度增加而增大,底部桩应力不变。经研究分析,当封壳变厚时,桩头应力衰减速率随着封壳处深度增加而降低。

本文通过数值模拟和现场试验相结合对变截面筒桩进行分析,通过数值模拟了解筒桩承载力主要分布部位及不同设计方案下承载力等性能的表现状况,明确了桩体受力状况,为工程设计提供了参考。通过现场试验对数值模拟结果进行验证,为工程应用提供了借鉴经验,但是未与其他设计方案进行分析比较,后续需要结合其他方法进行分析,可针对变截面筒桩的使用性能和耐久性等方面进行重点分析。

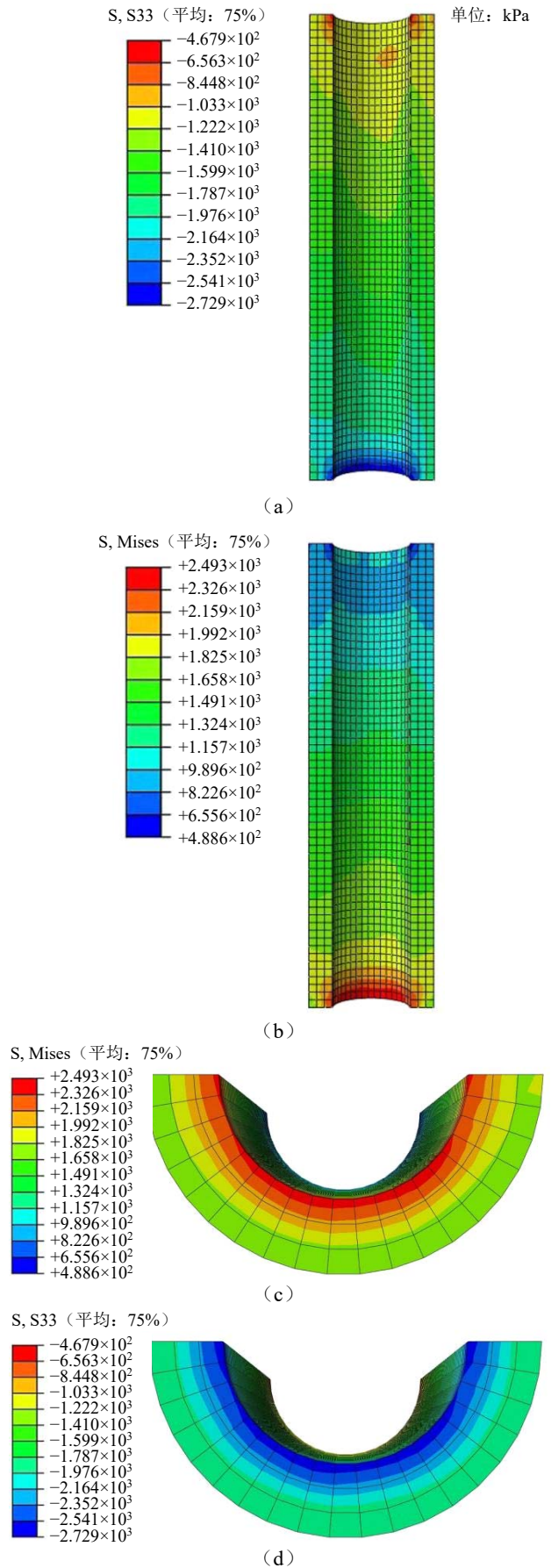


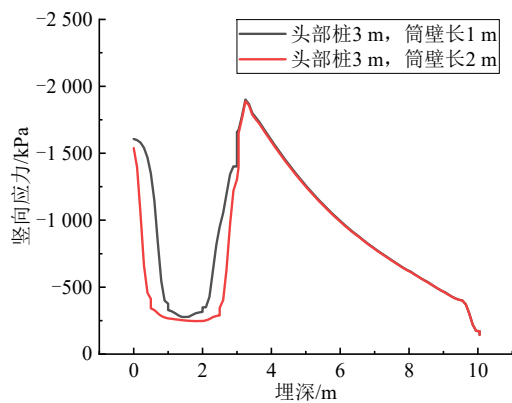
图9 1号试验桩桩体筒壁侧面和横截面应力云图

Fig. 9 Stress nephogram in the lateral and cross-section of the cylinder wall of test pile No. 1

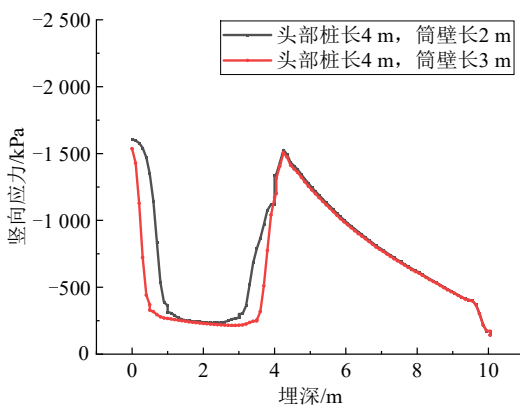
表 5 变截面筒桩几何参数优化

Table 5 Optimization of geometric parameters of variable cross-section tubular pile m

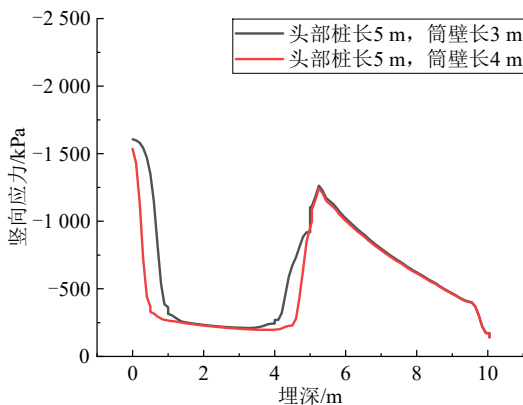
编号	筒壁长	底部桩长	上、下部桩(封壳)长	总长	头部桩直径	筒桩内径	底部桩直径
1	2	7					
2	3	6	0.5				
3	4	5		10	0.8	0.5	0.5
4	1	7					
5	2	6	1.0				
6	3	5					



(a) 3 m 桩头



(b) 4 m 桩头



(c) 5 m 桩头

图 10 不同封壳厚度桩体内部埋深-竖向应力曲线图
Fig. 10 Internal depth-vertical stress curves of piles with different casing thicknesses

3 结 论

(1) 变截面筒桩的破坏模式不同于传统圆柱形桩, 传统圆柱形桩的破坏(应力最大处)发生在桩上部靠近桩顶的位置, 而变截面筒桩的破坏发生在上部桩和筒壁交界处。

(2) 变截面筒桩内侧和外侧应力分布相反。

(3) 由于变截面筒桩的最大应力出现在上交界面处, 施工过程中可在此处增大水泥掺量并增加该处的厚度以获得更大的强度。

(4) 通过数值模拟与实测值对比, 发现变截面筒桩具有良好的承载特性, 可应用于工程。

参考文献

[1] 于龙海. 水泥搅拌桩在高速公路中的应用研究[J]. 工程机械与维修, 2022(6): 157-159.
YU Long-hai. Study on application of cement mixing pile in highway subgrade[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2022(6): 157-159.

[2] 孙玉洁. 软土地区水泥土搅拌桩路基长期沉降特性的数值分析[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(7): 117-119.
SUN Yu-jie. Numerical analysis of long-term settlement characteristics of cement-soil mixing pile subgrade in soft soil area[J]. China Water Transport, 2022, 22(7): 117-119.

[3] 龙晓鹏. 水泥土搅拌桩复合地基承载特性分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
LONG Xiao-peng. Analysis of bearing characteristics of cement soil mixing pile composite foundation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021.

[4] 闫超. 变截面搅拌桩复合地基稳定分析方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
YAN Chao. Research on the stability analysis of variable deep mixed column composite foundation[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[5] COLȚ O E, NEAGU C P, MOTĂU A, et al. Variable diameter pile foundations-advantages and disadvantages[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing Ltd., 2024, 1304: 012019.

[6] 盛寿桥, 任亚芹, 赵常山. 现浇混凝土薄壁筒桩在高速公路软土地基中的应用[J]. 浙江交通科技, 2003(4): 7-9.
SHENG Shou-qiao, REN Ya-qin, ZHAO Chang-shan.

- Application of cast-in-place concrete thin-walled cylinder piles in highway soft ground foundation[J]. *Journal of Zhejiang Transportation Science & Technology*, 2003(4): 7-9.
- [7] 席培胜. 变截面水泥土双向搅拌桩技术及承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
XI Pei-sheng. Study on technology and bearing characteristics of variable cross-section cement-soil bidirectional mixing pile[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [8] 向玮, 刘松玉, 经绯, 等. 变径水泥土搅拌桩处理软土地基的应用研究[J]. *工程勘察*, 2009, 37(3): 22-26.
XIANG Wei, LIU Song-yu, JING Fei, et al. Application of soil-cement deep mixing columns with different cross-section parts to the treatment of soft soil[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(3): 22-26.
- [9] 季树勋. 环城道路水泥搅拌桩复合地基沉降计算分析及其数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2007.
JI Shu-xun. The settlement analysis and numerical simulation of composite cement mixing pile foundation in the ring road[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [10] OKHRAVI S, GOHARI S, ALEMI M, et al. Numerical modeling of local scour of non-uniform graded sediment for two arrangements of pile groups[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2023, 38(4): 597-614.
- [11] 邝晓婷. 基于 ABAQUS 的软土地基工程数值模拟研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
KUANG Xiao-ting. Numerical simulation study on soft soil foundation engineering based on ABAQUS[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.
- [12] SHIMOMURA Y, IKEDA Y, OHSHIMA K, et al. A study of dynamic interaction of soil and pile with non-uniform section[C]//*Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*. 2000.
- [13] 赵铁平. 水泥搅拌桩复合地基数值模拟[J]. *交通标准化*, 2007(8): 83-86.
- ZHAO Tie-ping. Numerical value simulation of cement mixing method composite foundation[J]. *Transport Research*, 2007(8): 83-86.
- [14] 郗文. 变截面搅拌桩加固高速公路成层软弱地基试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
XI Wen. Experimental study on variable section mixed pile reinforcement of stratified weak foundation of highway[D]. Nanjing: Southeast University, 2011.
- [15] 吴晓荣, 王东栋, 水艳. 水泥土搅拌桩复合地基沉降设计参数数值分析[J]. *治淮*, 2013(12): 84-85.
WU Xiao-rong, WANG Dong-dong, SHUI Yan. Numerical analysis of settlement design parameters of composite foundation with hydraulic soil mixed pile[J]. *Zhihuai*, 2013(12): 84-85.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [17] JUIRNARONGRIT T, ASHFORD S A. Effect of pile diameter on the modulus of sub-grade reaction[R]. San Diego: University of California, 2001.
- [18] 向玮, 刘松玉, 经绯, 等. 深长变径搅拌桩荷载传递规律的试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 2765-2771.
XIANG Wei, LIU Song-yu, JING Fei, et al. Field test research on load transfer law of long soil-cement deep mixing columns with different cross-sections[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2765-2771.
- [19] RYBAK J, BACAM, ZYREK T. Practical aspects of tubular pile axial capacity testing[C]//*15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. 2015, 2(1): 549-554.